第 38 卷第 8 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.38, No.8
2017 年 8 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Aug., 2017

# 变质量流率蒸汽浸没射流压力振荡特性研究

王禄涛 赵全斌 王迎春 种道彤 陈伟雄

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安 710049)

**摘 要** 本文对变质量流率蒸汽浸没射流压力振荡特性开展了实验研究，发现蒸汽质量流率随时间延长呈指数规律下降。蒸汽射流凝结经历了稳定凝结、振荡凝结、过渡喘振和喘振四个阶段，射流初始水温越高，各个凝结区域转换点对应的蒸汽质量流率越高。在不同的凝结区域，蒸汽质量流率和过冷水温度对振荡特性的影响程度不同。相同蒸汽质量流率时，初始水温越高振荡频率越小。振荡强度均方根值和峰值均在凝结振荡区达到最大，且初始水温越高，最大值对应的蒸汽质量流率越高，振荡强度峰值最高可达 70 kPa。

**关键词** 变质量流率；振荡频率；振荡强度
**中图分类号**: TK121 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253–231X(2017)08–1697–05

## Research on Characteristic of Pressure Oscillation for Submerged Steam Jet With Variable Mass Flux

WANG Lu-Tao ZHAO Quan-Bin WANG Ying-Chun CHONG Dao-Tong CHEN Wei-Xiong

(*State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*)

**Abstract** In this study, the characteristic of pressure oscillation for submerged steam jet with variable mass flux was investigated experimentally. It was found that the steam mass flux nearly decreased with time increasing following exponential law. Steam condensation experienced four stages: stable condensation, condensation oscillation, transition chugging and chugging. The higher the initial water temperature was, the larger the steam mass flux that transformation position corresponded was. In different condensation regimes, the impact of steam mass flux and water temperature was different. With the same steam mass flux, oscillation frequency decreased when initial water temperature increased. The RMS and peak value of oscillation intension reached the maximum in condensation oscillation regime. And the higher initial water temperature was, the higher the steam mass flux that maximum value corresponded was. The maximum value of peak oscillation intension could reach 70 kPa.

**Key words** variable mass flux; oscillation frequency; oscillation intension

## 0 前 言

蒸汽浸没射流是汽水直接接触凝结换热的一种形式，由于具有高效的传质传热特性，被广泛的应用于各种工业领域，如核反应堆中的泄压系统、乏汽回收利用装置等。但蒸汽射流过程存在压力振荡，振荡产生的冲击载荷和振荡频率严重影响相关设备的安全运行。因此，研究蒸汽浸没射流压力振荡特性对于相关设备的设计和安全运行具有十分重要的意义。

Cho 等 [1] 通过实验将蒸汽浸没射流凝结分为六个凝结区域：喘振区、过渡喘振区、凝结振荡区、稳定凝结区、汽泡振荡区以及界面振荡区。前人针对不同凝结区域的压力振荡特性进行了广泛的研究，Damasio 等 [2] 通过实验研究发现低质量流率射流的振荡频率与喷嘴直径有关并给出了振荡频率的无量纲计算公式。Fukuda 等 [3] 发现低质量流率的振荡频率与过冷度成正比与喷嘴直径成反比。Yuan 等 [4] 得到了凝结振荡区的压力振荡与汽泡的尺寸以及移动速度有关的结论，并发现振荡频率随水温及蒸汽质量流率的增加而减小。Chen 等 [5] 分析了蒸汽射流低频信号的产生机理，并对其强度进行了分析。武心壮等 [6,7] 得出了稳定凝结区的振荡频率随水温和蒸汽质量流率的增加而减小的结论，发现频

**收稿日期**: 2017-01-18; **修订日期**: 2017-07-19
**基金项目**: 国家自然科学基金 (No.51476128)
**作者简介**: 王禄涛 (1992-)，男，博士研究生，主要从事蒸汽浸没射流实验和数值模拟研究，管内汽液直接接触凝结换热研究。
**通信作者**: 种道彤，教授，Email: dtchong@mail.xjtu.edu.cn

率变化规律与强度相反。Hong 等 [8] 提出了一个计算稳定凝结区振荡频率的理论模型。Zhao 等 [9] 发现稳定凝结区的压力振荡强度随轴向距离的增加先增大后减小，峰值点与汽羽尾部位置相对应。Chong 等 [10] 对稳定凝结区压力振荡特性进行了实验研究，发现第二主频随着水温和蒸汽质量流率的增加而降低。

可以发现前人的研究集中于定质量流率下蒸汽浸没射流的压力振荡特性，对于变质量流率蒸汽浸没射流研究较少。但是很多工业应用中蒸汽量是一定的，例如核反应堆稳压罐泄压过程，将一定量蒸汽射流到过冷水中发生凝结，蒸汽质量流率持续下降，蒸汽凝结经历多个不同凝结区域。一定蒸汽量下的变质量流率蒸汽浸没射流的研究对相关设备的优化设计和安全运行具有重要指导意义。因此，本文通过实验对不同初始水温的变质量流率蒸汽浸没射流的压力振荡特性进行研究，得到蒸汽质量流率和过冷水温度对射流全过程压力振荡频率和强度的影响规律，为存在此现象的工业应用场合提供参考。

# 1 实验系统与方法

蒸汽浸没射流实验系统如图 1 所示。实验系统主要包括蒸汽发生器、蒸汽管路、调节阀、稳压罐、通孔喷嘴、射流水箱、带有温度和压力探针的三维移动支架以及数据采集系统等。饱和蒸汽由蒸汽发生器提供，在稳压罐中压力稳定后，经绝热的蒸汽管道流经各个阀门，最后通过喷嘴射流进入过冷水中凝结。通过调节阀控制蒸汽质量流率，流场区域的压力通过安装在三维可移动支架上的高频动态压力传感器测得。实验过程中压力测点位于喷嘴出口径向无量纲距离为 7、轴向 0 的位置处，由水箱中布置的八个 T 型热电偶测量过冷水温度，通过数据采集系统记录实验测量数据。

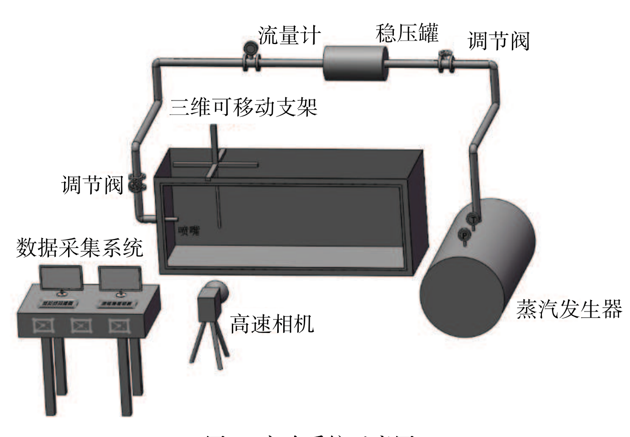



图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

本文在不同初始水温下进行变质量流率蒸汽浸没射流实验。将蒸汽发生器中蒸汽加热到 650 kPa，然后关闭蒸汽发生器，使调节阀处于全开状态进行实验，具体实验条件如表 1 所示。

**表 1 实验条件**

**Table 1 Test conditions in experiment**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 喷嘴出口直径/mm | 8 |
| 测点轴向位置/mm | 0 |
| 测点径向位置/mm | 56 |
| 蒸汽压力/kPa | 50～650 |
| 初始水温/°C | 16, 55 |
| 采样频率/Hz | 5000 |

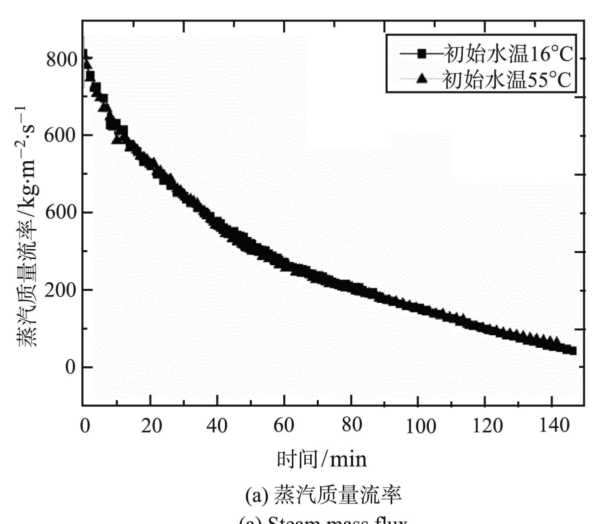
# 2 实验结果与分析

## 2.1 汽水参数变化规律

通过蒸汽浸没射流实验，获得了不同初始水温下射流的蒸汽质量流率随时间的变化规律， 如图 2(a) 所示。随着时间的延长，蒸汽质量流率几乎呈指数规律减小，变化规律与水温无关。这是因为随着蒸汽质量流率的减小，蒸汽发生器压力减小的越来越慢，蒸汽质量流率变化越来越小。射流过程中的过冷水温度随蒸汽质量流率的变化规律如图 2(b) 所示。随着蒸汽质量流率的降低，水温逐渐上升，但是上升幅度越来越小。

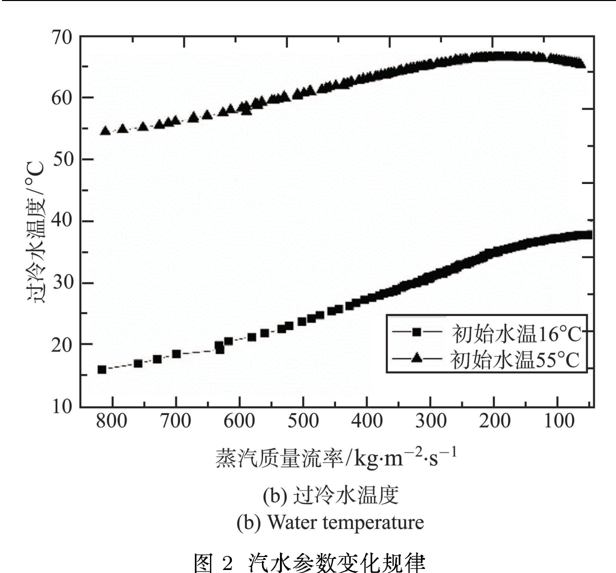
## 2.2 振荡频率

振荡频率是蒸汽浸没射流压力振荡的一个重要特征参数，对于设备的安全运行有重要的影响。因此，本文对射流全过程振荡频率的变化规律进行了




(a) 蒸汽质量流率

(a) Steam mass flux



(b) 过冷水温度
(b) Water temperature

图 2 汽水参数变化规律
Fig. 2 Change rules of steam and water parameters

研究，结果如图 3 所示。随着蒸汽射流时间的延长，蒸汽质量流率逐渐降低，蒸汽凝结经历了稳定凝结、振荡凝结、过渡喘振及喘振四个阶段。

射流初始阶段，蒸汽质量流率约从 800 $\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$ 开始下降，蒸汽凝结处于稳定凝结区，随着蒸汽质量流率降低，射流初始水温为 16°C 的振荡频率逐渐增加，而射流初始水温为 55°C 的几乎不变。在稳定凝结区，振荡频率与汽羽穿透长度变化有关 [3]，射流初始水温为 16°C 时，蒸汽质量流率的变化占主导作用，汽羽穿透长度变化周期随蒸汽质量流率的减小而减小，振荡频率增加；初始水温为 55°C 时，水温的变化对振荡频率的影响作用增加。此时蒸汽质量流率和水温的影响作用达到平衡，振荡频率基本保持不变。

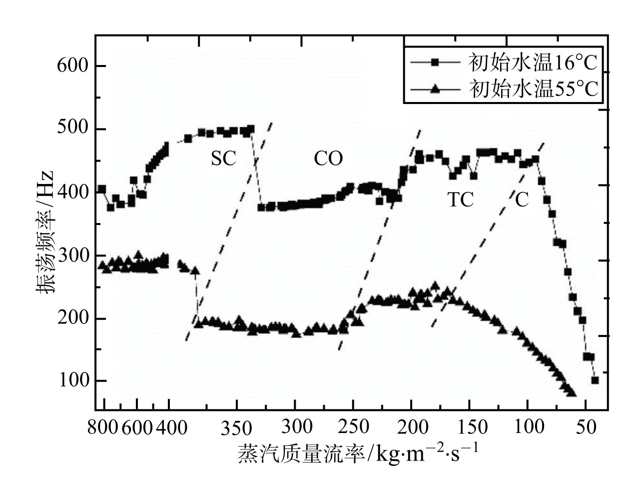


图 3 振荡频率变化规律
Fig. 3 Change rules of oscillation frequency

蒸汽质量流率减小到 350 $\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$ 左右时，频率有一个骤降的过程，这是由于蒸汽凝结由稳定凝结区转换到振荡凝结。在凝结振荡区，压力振荡是由汽泡的演变引起的 [4]，汽泡经历了生成、生长、脱离、溃灭的过程，汽液相界面变化周期变长，频率减小。水温越高转换点对应的蒸汽质量流率越高，因为随着水温升高，需要增加蒸汽量满足稳定凝结的条件。

在凝结振荡区，随着蒸汽质量流率的减少，初始水温为 16°C 的振荡频率逐渐增加，而初始水温为 55°C 的振荡频率逐渐减小。当水温较低时，蒸汽质量流率的变化占主导作用，随着蒸汽质量流率的降低，汽泡体积越来越小，凝结时间变短，振荡频率增加；水温较高时，水温的变化占主导作用，随着水温的升高，汽泡体积变大，凝结时间变长，振荡频率减小。

蒸汽质量流率接近 250 $\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$ 时，振荡频率有一个增加的过程，因为蒸汽凝结区域由凝结振荡区转换到过渡喘振区。在过渡喘振区，喷嘴出口出现很多小汽泡，变化周期较短，振荡频率较大。过渡区的振荡频率基本不变，此时蒸汽质量流率和水温的影响达到平衡。蒸汽凝结转换到喘振区后，振荡频率逐渐降低。在喘振区时，蒸汽质量流率较小，水温变化较小，蒸汽质量流率的变化占主导作用。在喘振区，过冷水快速将蒸汽凝结，然后倒流进喷嘴中，再被新蒸汽推出喷嘴，蒸汽质量流率越小，过冷水流进和流出喷嘴周期越长，振荡频率越小。

蒸汽质量流率相同时，射流初始水温越高，振荡频率越小。因为蒸汽质量流率相同时，过冷水温度越高，汽液相界面变化周期越长，振荡频率越小。

### 2.3 振荡强度

本文采用均方根值和峰值两种方式对蒸汽浸没射流压力振荡强度进行研究，其中振荡强度均方根值的变化规律表示振荡强度的整体变化趋势，可以通过式 (1) 计算得到；而振荡强度峰值可以为设计载荷提供参考。

$$P=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i-P_m)^2} \tag{1}$$

其中 $P_m=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N}P_i$ 为传感器测得的平均压力。

不同初始水温射流的压力振荡强度均方根值随蒸汽质量流率的变化规律如图 4 所示。在稳定凝

结区，压力振荡强度变化较小，因为在稳定凝结区蒸汽以汽羽形式凝结，汽液相界面比较稳定，振荡强度变化较小。蒸汽质量流率接近 350 kg·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 时，振荡强度明显增加，因为蒸汽凝结开始由稳定凝结转化到振荡凝结，蒸汽开始以汽泡的形式发生凝结，导致汽液相界面波动剧烈，振荡强度增强。

在凝结振荡区，随着蒸汽质量流率的降低，振荡强度先增大后减小，存在一个峰值，射流初始水温越高，峰值位置对应的蒸汽质量流率越高。因为蒸汽凝结由稳定凝结区转换到凝结振荡区是一个渐变的过程，在完全转换到凝结振荡区之前，振荡强度逐渐增加，完全转换为凝结振荡区时达到最大值。水温越高，稳定凝结区完全转换为凝结振荡区需要的蒸汽质量流率越大，峰值位置对应的质量流率越高。峰值点之后，随着蒸汽质量流率的减小汽泡体积逐渐变小，振荡强度减小。

在过渡喘振区和喘振区，随着蒸汽质量流率减小振荡强度逐渐减小。因为蒸汽质量流率越低，汽液相界面波动幅度越小，振荡强度越小。

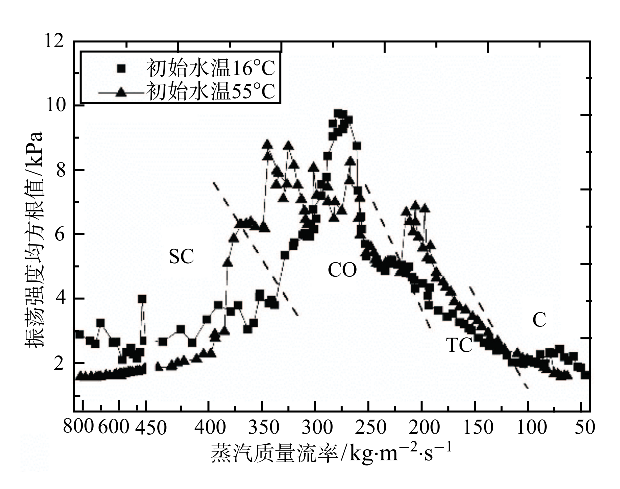


图 4 振荡强度均方根值变化规律

Fig. 4 Change rules of RMS value for oscillation intension

压力振荡强度峰值的变化规律如图 5 所示，可以看出振荡强度峰值变化规律与均方根值变化规律相似。整个射流过程中，振荡强度峰值在凝结振荡区最大，且射流初始水温越高，最大峰值对应的蒸汽质量流率越高，最高可达 70 kPa，近似是稳定凝结区的 5 倍。

通过研究可以发现，过冷水温度越高，蒸汽射流凝结的振荡频率越低，且振荡强度在凝结振荡区达到最大值。因此实际应用中应该避免蒸汽在高水温的凝结振荡区凝结。

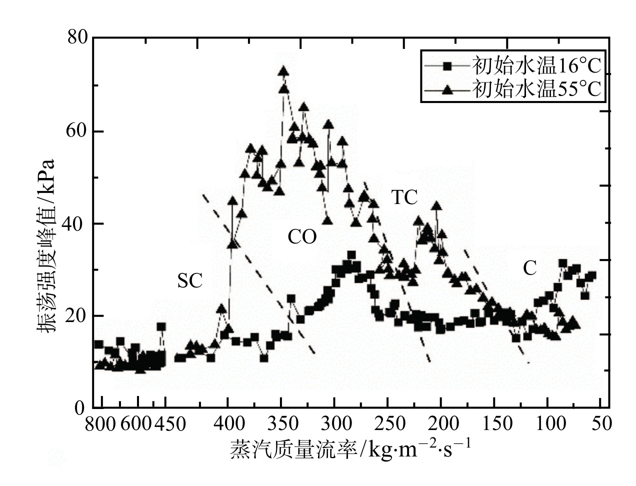


图 5 振荡强度峰值的变化规律

Fig. 5 Change laws of peak value for oscillation intension

## 3 结 论

本文针对变质量流率蒸汽浸没射流的压力振荡特性进行了实验研究，获得了蒸汽质量流率和过冷水温度对射流全过程的振荡频率及强度的影响规律，实验蒸汽压力为 50~650 kPa，射流初始水温为 16°C、55°C。本文主要结论如下：

1) 蒸汽质量流率随时间延长近似呈指数规律下降；蒸汽凝结经历了稳定凝结、振荡凝结、过渡喘振和喘振四个阶段，射流初始水温越高，各个凝结区域转换点对应的蒸汽质量流率越高。

2) 在不同的凝结区域，蒸汽质量流率和水温对振荡特性的影响程度不同；蒸汽质量流率相同时，射流初始水温越高，振荡频率越小。

3) 压力振荡强度均方根值和峰值均在凝结振荡区达到最大，并且初始水温越高，最大值对应的蒸汽质量流率越高，振荡强度峰值最高可以达到 70 kPa。

## 参 考 文 献

[1] Cho S, Song C H, Park C K, et al. Experimental Study on Dynamic Pressure Pulse in Direct Contact Condensation of Steam Discharging Into Subcooled Water [C]//Proceedings of 1st Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS1), Pusan, Korea, 1998: 291–298

[2] Damasio C, Del T G, Fiegna G, et al. Experimental Study on the Unstable Direct Contact Condensation Regimes [C]//Proc of 3rd Int Topical Meeting on Reactor Thermal Hydraulics, Newport, Rhode Island , 1985

[3] Fukuda S. Pressure Variations due to Vapor Condensation in Liquid, (II) Phenomena at Large Vapor Mass Flow Flux [J]. Atom Energy Soc Japan, 1982, 24(6): 466–474

[4] Yuan F, Chong D T, Zhao Q B, et al. Pressure Oscillation and Steam Cavity During the Condensation of a Submerged Steam Jet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 98: 193–203

[5] Chen W X, Zhao Q B, Wang Y, et al. Characteristic of Pressure Oscillation Caused by Turbulent Vortexes and Affected Region of Pressure Oscillation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 76: 24–33

[6] 武心壮, 邱斌斌, 种道彤, 等. 单喷嘴蒸汽射流凝结引起的压力振荡研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 48–52
Wu X Z, Qiu B B, Chong D T, et al. Pressure Oscillation Induced by Steam Jet Condensation in Water Through a Nozzle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 48–52

[7] 武心壮, 邱健, 郭丹丹, 等. 蒸汽射流压力振荡主频研究 [J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2588–2591
Wu X Z, Qiu J, Guo D D, et al. Research on Main Frequency of Pressure Oscillation by Steam Jet in Water [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(10): 2588–2591

[8] Hong S J, Park G C, Cho S, et al. Condensation Dynamics of Submerged Steam Jet in Subcooled Water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 39: 66–77

[9] Zhao Q B, Chen W X, Yuan F, et al. Pressure Oscillation and Steam Cavity During the Condensation of a Submerged Steam Jet [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 85: 512–522

[10] Chong D T, Zhao Q B, Yuan F, et al. Experimental and Theoretical Study on the Second Dominant Frequency in Submerged Steam Jet Condensation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 68: 744–758